
5

LES CONVERTISSEURS DC/AC : LES ONDULEURS AUTONOMES

1. Introduction

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

Comme on l'a vu au chapitre 3, un redresseur commandé tout thyristors peut fonctionner en onduleur. Ce type d'onduleur est dit « non autonome » ou encore « assisté » car il ne permet de fixer ni la fréquence ni la valeur efficace des tensions du réseau alternatif dans lequel il débite. On se propose dans ce chapitre d'étudier les onduleurs autonomes. Ces derniers fixent eux-mêmes la fréquence et la valeur efficace de leur tension de sortie.

2. Principe général de fonctionnement

Pour réaliser un onduleur autonome, il suffit de disposer d'interrupteurs K et d'une source de tension continue E .

2-1. Onduleur monophasé à commande symétrique

2-1-1. Onduleur avec source à point milieu

Chaque interrupteur est formé d'un transistor et une diode en antiparallèle comme le montre la figure (5-1).

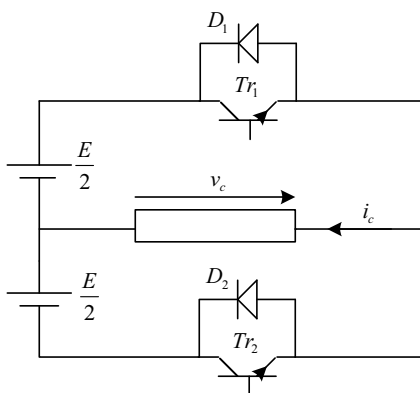


Figure (5-1) : Onduleur monophasé à point milieu

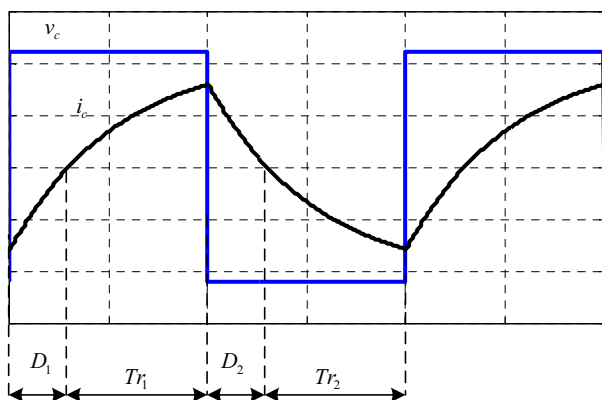


Figure (5-2) : Allure de la tension et du courant de charge R-L

2-1-1. Onduleur en pont

L'onduleur en pont est formé de quatre interrupteurs montés en pont de Grëatz. Les commandes des interrupteurs K_1 et K_1' sont complémentaires : $K_1 = \overline{K_1'}$ et $K_2 = \overline{K_2'}$. Chaque interrupteur est formé d'un composant commandable et une diode en antiparallèle.

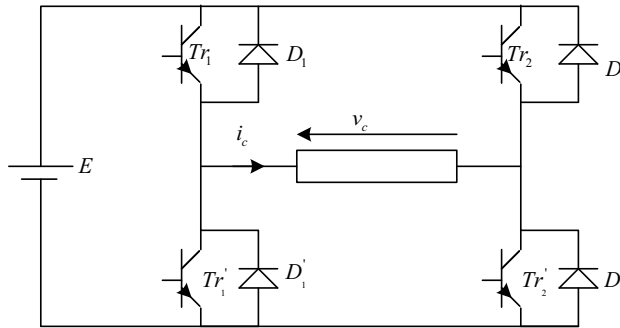


Figure (5-3) : Onduleur en pont

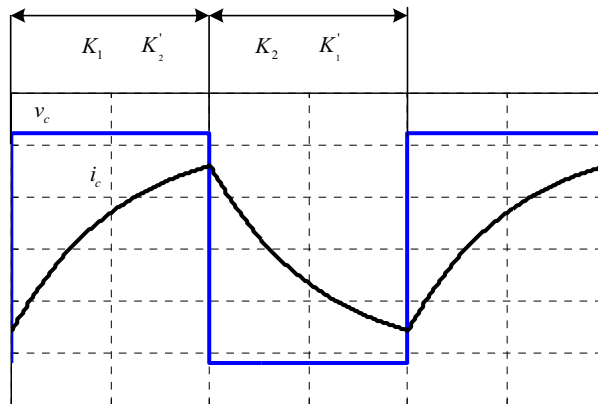


Figure (5-4) : Forme d'onde du courant et de la tension

La tension efficace de l'onde de la tension est fixée par la tension continue d'alimentation.

$$V_c^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_c^2 dt = E^2 \quad V_c = E$$

2-1. Onduleur monophasé à commande décalée

Dans la commande symétrique, les interrupteurs K_1 et K_2' sont commandés ensemble. De même les interrupteurs K_2 et K_1' sont aussi commandés ensemble. En commande décalée les interrupteurs K_1 et K_2' sont commandés avec un angle

de décalage β . La figure (5-5) illustre la forme d'onde de la tension et les intervalles de conduction des interrupteurs.

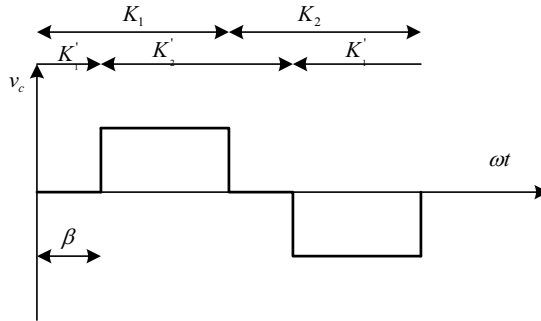


Figure (5-5) : Forme d'onde de la tension et intervalle de conduction

Etude de la tension de charge

La tension efficace est gouvernée par l'angle de décalage β . En effet :

$$V_c^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_c^2 d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi} E^2 d(\omega t) = E^2 \left(\frac{\pi - \beta}{\pi} \right)$$

$$V_c = E \sqrt{\frac{\pi - \beta}{\pi}}$$

Si on prend comme origine le milieu de l'alternance positive, le développement en série de Fourier donne :

$$v_c = \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n \left(\frac{\pi - \beta}{2} \right) \cos n \omega t$$

La figure (5-6) fournit l'évolution de la tension efficace et des amplitudes du fondamental, de l'harmonique trois et de l'harmonique cinq.

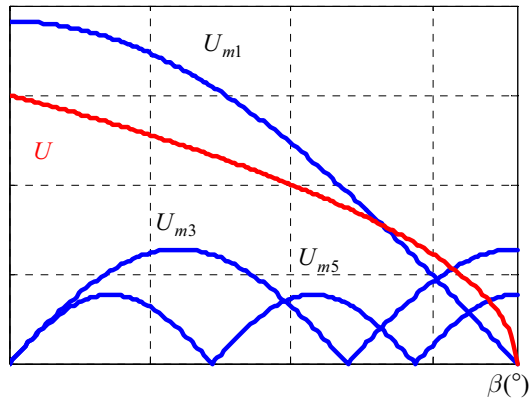


Figure (5-6) : Evolution du fondamental et des harmoniques trois et cinq en fonction de l'angle de décalage

Etude du courant

La charge est supposée inductive de résistance R et d'inductance L . Pour $\omega t = \theta = 0$, le courant $i_c = I_0 < 0$.

- $\theta \in [0, \beta]$

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \qquad i_c = I_0 e^{-\frac{\theta}{Q}}$$

avec $Q = \frac{L\omega}{R}$

Pour $\omega t = \theta = \beta$, $i_\beta = I_0 e^{-\frac{\beta}{Q}}$

- $\theta \in [\beta, \pi]$

$$v_c = E = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \qquad i_c = \frac{E}{R} + (i_\beta - \frac{E}{R}) e^{-\frac{(\theta-\beta)}{Q}}$$

Pour $\omega t = \theta = \pi$, $i_{\max} = \frac{E}{R} + (i_\beta - \frac{E}{R}) e^{-\frac{(\pi-\beta)}{Q}}$

- $\theta \in [\pi, \pi + \beta]$

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \quad i_c = -I_0 e^{-\frac{(\theta-\pi)}{Q}}$$

$$- \theta \in [\pi + \beta, 2\pi]$$

$$v_c = -E = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \quad i_c = -\frac{E}{R} - (i_\beta - \frac{E}{R}) e^{-\frac{(\theta-\pi-\beta)}{Q}}$$

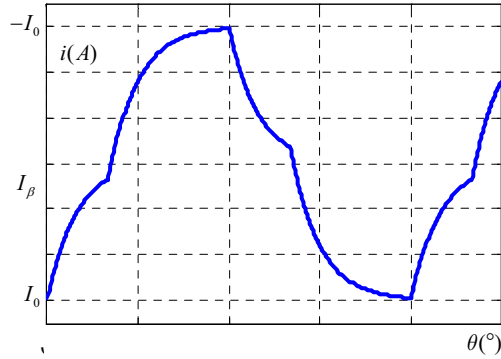


Figure (5-7) : Allure du courant de charge

2-3 Onduleur triphasé

La figure (5-8) donne le schéma de principe d'un ensemble onduleur moteur asynchrone. L'onduleur est alimenté par une source de tension continue V_{DC} . Les interrupteurs d'un même bras de l'onduleur sont toujours complémentaires. Chaque interrupteur de puissance est en réalité réalisé par un transistor en anti-parallèle avec une diode. Ces composants sont supposés idéaux.

Les interrupteurs de chaque bras de l'onduleur étant complémentaires ; il en est de même pour les signaux associés de commande. On peut donc écrire :

$$c_4 = 1 - c_1 \quad c_5 = 1 - c_2 \quad c_6 = 1 - c_3$$

Les tensions simples du moteur sont notées $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_3(t)$.

Les tensions composées du moteur sont notées $u_{12}(t)$, $u_{23}(t)$ et $u_{31}(t)$.

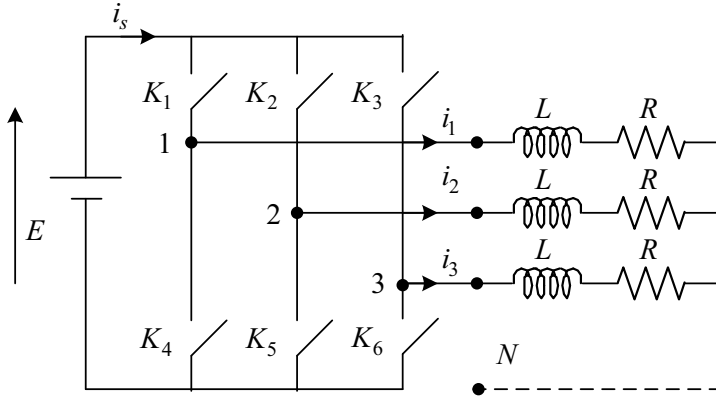


Figure (5-8) : Onduleur triphasé

La tension v_{10} vaut $\frac{V_{DC}}{2}$ lorsque $c_1 = 1$ et $c_4 = 0$. Elle devient $-\frac{V_{DC}}{2}$ lorsque $c_1 = 0$ et $c_4 = 1$. Le même raisonnement est valable pour v_{20} en utilisant les commandes c_2 et c_5 d'une part et pour v_{30} en utilisant les commandes c_3 et c_6 . Les tensions v_{10} , v_{20} et v_{30} sont données par les relations suivantes.

$$\begin{cases} v_{10} = (c_1 - c_4) \frac{V_{DC}}{2} = (2c_1 - 1) \frac{V_{DC}}{2} \\ v_{20} = (c_2 - c_5) \frac{V_{DC}}{2} = (2c_2 - 1) \frac{V_{DC}}{2} \\ v_{30} = (c_3 - c_6) \frac{V_{DC}}{2} = (2c_3 - 1) \frac{V_{DC}}{2} \end{cases}$$

Les tensions composées s'expriment alors par :

$$\begin{cases} u_{12} = v_{10} - v_{20} = (c_1 - c_2) V_{DC} \\ u_{23} = v_{20} - v_{30} = (c_2 - c_3) V_{DC} \\ u_{31} = v_{30} - v_{10} = (c_3 - c_1) V_{DC} \end{cases}$$

Le système de tension v_1 , v_2 et v_3 est équilibré; ce qui permet d'établir les expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{u_{12} - u_{31}}{3} \\ v_2 = v_1 - u_{12} = \frac{-2u_{12} - u_{31}}{3} \\ v_3 = v_1 + u_{31} = \frac{u_{12} + 2u_{31}}{3} \end{cases}$$

On tire finalement :

$$\begin{cases} v_1 = (2c_1 - c_2 - c_3) \frac{V_{DC}}{3} \\ v_2 = (2c_2 - c_1 - c_3) \frac{V_{DC}}{3} \\ v_3 = (2c_3 - c_1 - c_2) \frac{V_{DC}}{3} \end{cases}$$

Les tensions simples s'écrivent aussi sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$$

La relation précédente montre qu'il existe huit combinaisons possibles de (c_1, c_2, c_3) . A partir de ces combinaisons, nous déterminons huit vecteurs tensions délivrées par l'onduleur dont six non nulles $(\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_6)$ et deux sont nuls $(\bar{v}_0 \text{ et } \bar{v}_7)$. La table (5-1) illustre les vecteurs tension en fonction de l'état des interrupteurs. La figure (5-11) représente les vecteurs espace tension délivrés par l'onduleur.

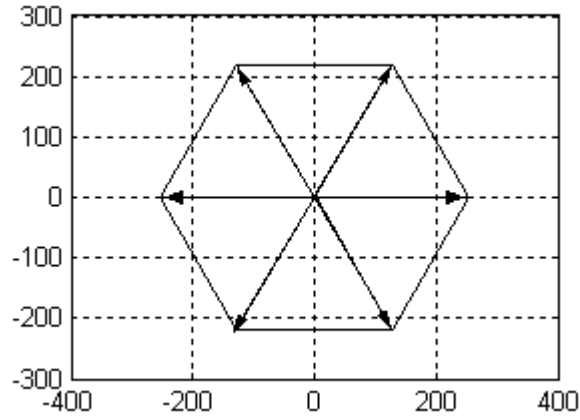


Figure (5-9) : Hexagone des tensions de l'onduleur

$\bar{v}_s = v_d + jv_q$	c_1	c_2	c_3	\bar{v}_k
0	0	0	0	\bar{v}_0
0	1	1	1	\bar{v}_7
$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}\left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	1	1	0	\bar{v}_2
$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}\left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	1	0	1	\bar{v}_6
$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	0	1	0	\bar{v}_3
$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$	0	0	1	\bar{v}_5
$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$	1	0	0	\bar{v}_1
$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$	0	1	1	\bar{v}_4

Table(5-1) : combinaisons possibles

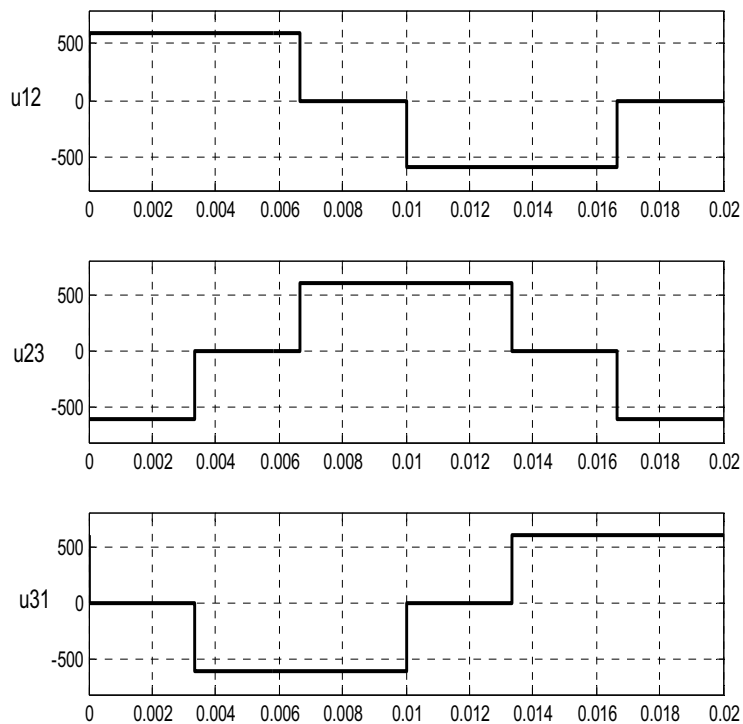


Figure (5-10) : Les tensions composées

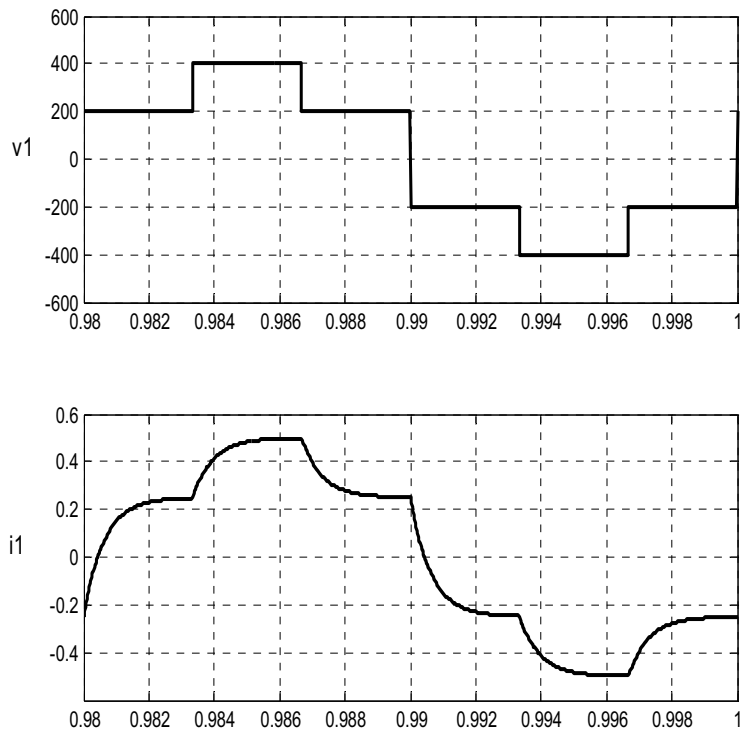
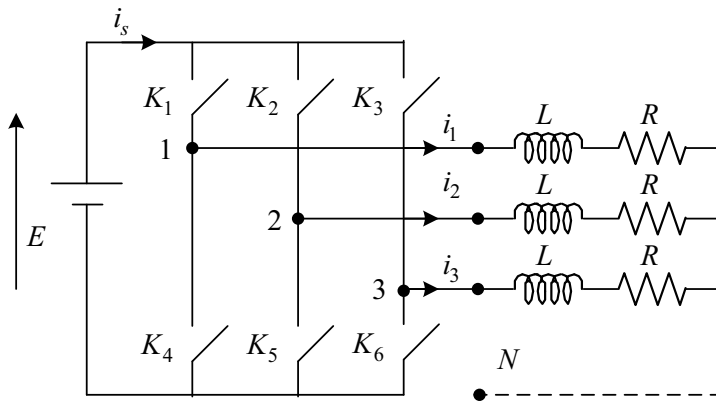


Figure (5-11) : Tension simple et courant de charge (R-L)

3- Travaux dirigés

Exercice N°1

On se propose d'étudier le comportement d'un convertisseur DC/AC de fréquence f alimentant une charge triphasée montée en étoile ; chaque élément est constitué d'une résistance R en série avec une inductance L . Le schéma du circuit de puissance est donné par la figure 1. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode supposés parfaits. La tension d'alimentation de l'onduleur est une tension continue constante E .



On donne : $R = 800\Omega$, $L = 0.5 H$ et $E = 600V$, $\omega = 2\pi f = 100\pi$

Les intervalles de conduction des interrupteurs sont indiqués pour une période de fonctionnement T à la feuille jointe du document réponse **DR**.

1°) Analyser le fonctionnement sur une période de fonctionnement en déterminant les tensions composées u_{12} , u_{23} et u_{31} . (3points)

2°) Représenter sur le document réponse **DR**, en indiquant les valeurs numériques, les tensions composées u_{12} , u_{23} et u_{31} . (1.5 points)

3°) En déduire les expressions des tensions simples entre une phase et le neutre v_1 , v_2 et v_3 sachant que $v_1 + v_2 + v_3 = 0$. (1.5 points)

4°) Représenter sur le même document la tension simple v_1 . (1.5 point)

5°) Etablir une relation entre la valeur efficace V de la tension simple v_1 et E . (1.5 point)

6°) Déterminer le courant dans la charge i_1 et préciser ses valeurs pour les instants $\left[\frac{T}{6}, \frac{T}{3}, \frac{T}{2}\right]$ sachant sa valeur initiale est $I_0 = -0.25 A$. (4.5 points)

7°) En déduire les valeurs du courant i_1 pour les instants $\left[\frac{2T}{3}, \frac{5T}{6}, T\right]$. (1.5 points)

8°) Représenter sur le même document **DR** l'allure du courant i_1 sur une période de fonctionnement T . (1 point)

9°) Spécifier les intervalles de conduction des interrupteurs K_1 et K_4 . (2 points)

10°) On se limite au fondamental du courant i_1 et de la tension v_1 . Ces grandeurs sont exprimées par : $i_{1F} = 0.5 \sin(\omega t - 0.1257)$ et $v_1 = \frac{2E}{\pi} \sin(\omega t)$. Déterminer les puissances active et réactive dans la charge. (2 points).

Document Réponse DR

